



Ricerca di Sistema elettrico

Parte A: Attività sperimentali sul dispositivo PEWEC in scala 1:12

G. Mattiazzo, E. Giorcelli, G. Bracco, N. Pozzi, E. Giovannini,
A. Fontanella, G. Sannino

PARTE A: ATTIVITÀ SPERIMENTALI SUL DISPOSITIVO PEWEC IN SCALA 1:12

G. Mattiazzo, E. Giorcelli, G. Bracco, N. Pozzi (Politecnico di Torino)
E. Giovannini, A. Fontanella, G. Sannino (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

Obiettivo: Sviluppo di un sistema oscillante passivo per il recupero di energia dal moto ondoso

Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Progettazione e sperimentazione in vasca di un modello in scala 1:12 di un sistema per la produzione di energia da moto ondoso"

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Prof. Giuliana Mattiazzo

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1.1 <i>Layout del sistema</i>	5
2.1.2 <i>Lo scafo</i>	6
2.1.3 <i>L'assetto del generatore</i>	6
2.2 SVOLGIMENTO DELLE PROVE.....	9
2.2.1 <i>Il setup sperimentale</i>	10
2.2.2 <i>Il sistema di ormeggio</i>	12
2.2.3 <i>Misura del profilo dell'onda</i>	15
2.2.4 <i>Misura dell'angolo δ di beccheggio dello scafo</i>	18
2.2.5 <i>Misura di angolo, velocità e coppia agenti sul PTO</i>	19
2.2.6 <i>Il sistema di controllo del PTO</i>	22
2.2.7 <i>Metodologia di esecuzione delle prove</i>	25
2.3 RISULTATI DELLE PROVE	26
2.3.1 <i>Prove per l'identificazione della risposta in frequenza (RAO) a pendolo bloccato</i>	26
2.3.2 <i>Prove di risposta in frequenza con coefficiente di smorzamento pari a 0.5 Nms/rad e rigidità nulla</i>	27
2.3.3 <i>Prove con onda a periodo $T = 1.3$ s, $c = 0.5$ Nms/rad e rigidità variabile</i>	30
3 CONCLUSIONI.....	32
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	33

Sommario

Le attività svolte nell'ambito dell'accordo di Collaborazione tra ENEA e Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, hanno riguardato la progettazione, realizzazione e sperimentazione di un sistema di conversione dell'energia da moto ondoso a massa oscillante.

Nel presente lavoro si mostra l'attività di sperimentazione sul prototipo del sistema di conversione di energia da moto ondoso a massa oscillante. In tale sistema le onde provocano l'oscillazione dello scafo che la trasmette al pendolo contenuto internamente. Il moto relativo scafo-pendolo attiva un generatore che produce energia elettrica.

Il prototipo in scala realizzato in collaborazione con ENEA è stato provato sperimentalmente presso il canale di prova del Politecnico di Torino nell'anno 2014 per diverse condizioni di moto ondoso e parametri di controllo del sistema.

I risultati della campagna di test sono stati confrontati con un modello numerico del sistema che è stato sviluppato all'interno dell'accordo di Collaborazione. Il modello numerico simula la dinamica del sistema e la potenza prodotta dal convertitore a partire dall'onda incidente.

Tale modello abbinato a una procedura di sintonizzazione ha prodotto una buona concordanza con i dati sperimentali.

In questo report si mostra l'evoluzione del setup di prova e delle prestazioni del prototipo, passando dall'utilizzo del canale al Politecnico di Torino al bacino n° 2 dell'INSEAN che grazie alle maggiori dimensioni permette di testare il prototipo senza l'influenza degli effetti di bordo. Il prototipo inoltre è stato migliorato in modo da essere completamente WiFi ed evitare i possibili errori di misura derivanti dalle rigidità dei cavi di collegamento degli apparati di bordo a quelli di terra.

Nella nuova campagna di prova vengono inoltre svolte una nuova tipologia di prova al variare della rigidità del PTO.

1 Introduzione

Oggetto dell'Accordo di Collaborazione è la progettazione, realizzazione e sperimentazione in scala di un sistema di produzione di energia da moto ondoso a massa oscillante.

Il prototipo è stato progettato in collaborazione ENEA – Politecnico di Torino ed è stato provato nell'anno 2014 presso il canale di prova del Politecnico di Torino.

In questa campagna di test i seguenti miglioramenti al setup sperimentale sono stati svolti:

1. Utilizzo del bacino n° 2 dell'Istituto INSEAN di Roma che ha dimensioni maggiori in modo da ridurre gli effetti di bordo che potessero verificarsi presso il canale del Politecnico di Torino
2. Implementazione di un sistema di controllo ed acquisizione completamente contenuto nel sistema galleggiante in modo da evitare le azioni di rigidità non trascurabile dei cavi di collegamento dei sistemi di bordo a quelli di terra precedentemente presenti nell'esperimento 2014.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1.1 Layout del sistema

Il prototipo è formato da uno scafo semicilindrico al cui interno è disposta una torre che sostiene il generatore (PTO, Power Take Off) al cui albero è vincolato il sistema oscillante pendolo. Le onde mettono in oscillazione lo scafo che a sua volta trasferisce il moto alla cerniera del pendolo, corrispondente all'asse del PTO: il pendolo inizia quindi a oscillare per reazione e trascina in oscillazione l'albero del PTO. Frenando il PTO è possibile estrarre energia dal moto del pendolo e in ultima analisi dal moto delle onde.

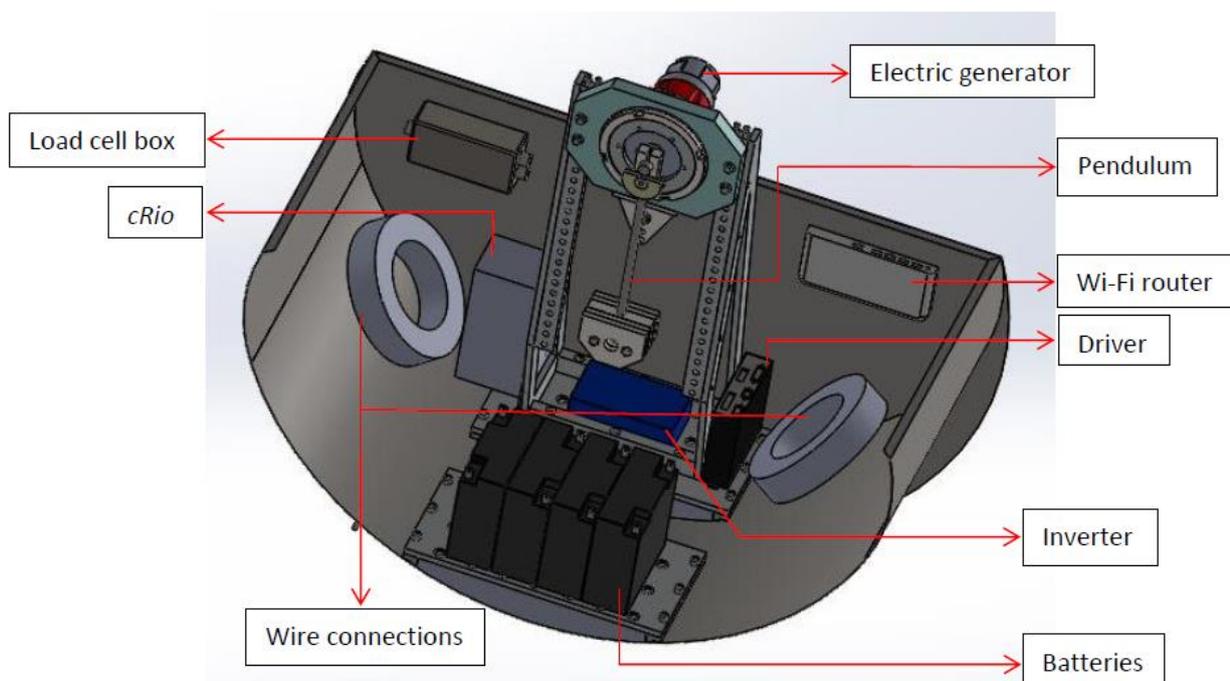


Figura 1 – Layout del prototipo

2.1.2 Lo scafo

Lo scafo è costituito da lamiere di acciaio inossidabile da 1 mm di spessore saldate tra loro. Ha forma di semicilindro ad asse orizzontale, con due alette laterali per favorirne l'allineamento rispetto alla direzione d'incidenza dell'onda.

Allo scafo è collegato rigidamente un telaio che supporta la cella di carico, il generatore elettrico e l'intero meccanismo a pendolo.

All'interno dello scafo sotto la base del pendolo sono state inserite le masse di bilanciamento per regolare l'altezza del baricentro rispetto alla linea di galleggiamento. Tale altezza deve essere tale da garantire la stabilità dello scafo sia rispetto il rollio che il beccheggio. La stabilità è intesa come la capacità del sistema di ritrovare l'equilibrio a fronte di una piccola perturbazione.

Con una serie di prove in acqua ferma, si è verificato che posizionando le masse di stabilizzazione nella parte inferiore dello scafo, ottenendo il peso previsto di 75 kg, il sistema è stabile nelle due coordinate di rollio e beccheggio in tutte le condizioni di assetto del generatore.

La massa di zavorra è ottenuta con blocchi di acciaio sagomati, collocati al fondo dello scafo, nello spazio tra le piastre forate di appoggio del telaio e la lamiera semicilindrica.

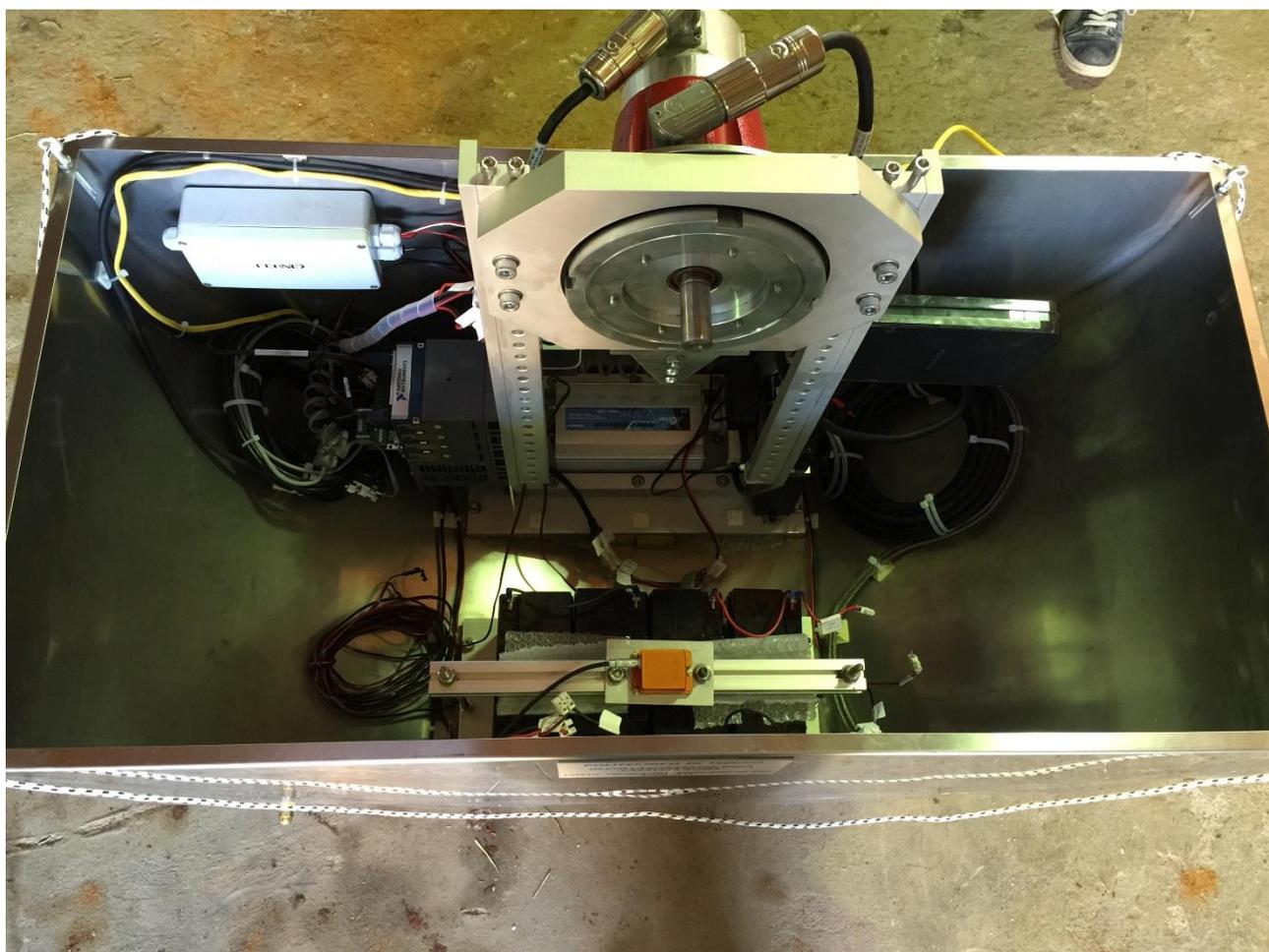


Figura 2 – vista interna del prototipo

2.1.3 L'assetto del generatore

Il telaio di sostegno del PTO ha una serie di fori con cui è possibile fissare il generatore a diverse altezze rispetto al fondo dello scafo, in modo da spostare il baricentro dello scafo e conseguentemente la sua risposta in ampiezza.

Il telaio è costituito da elementi di alluminio anodizzato assemblati con viti. Sono possibili 22 differenti settaggi, ma solo 16 sono effettivamente utilizzabili alla massima lunghezza del pendolo per problemi di interferenze tra le parti in movimento.

La Figura 3 mostra i limiti di settaggio della massa oscillante.

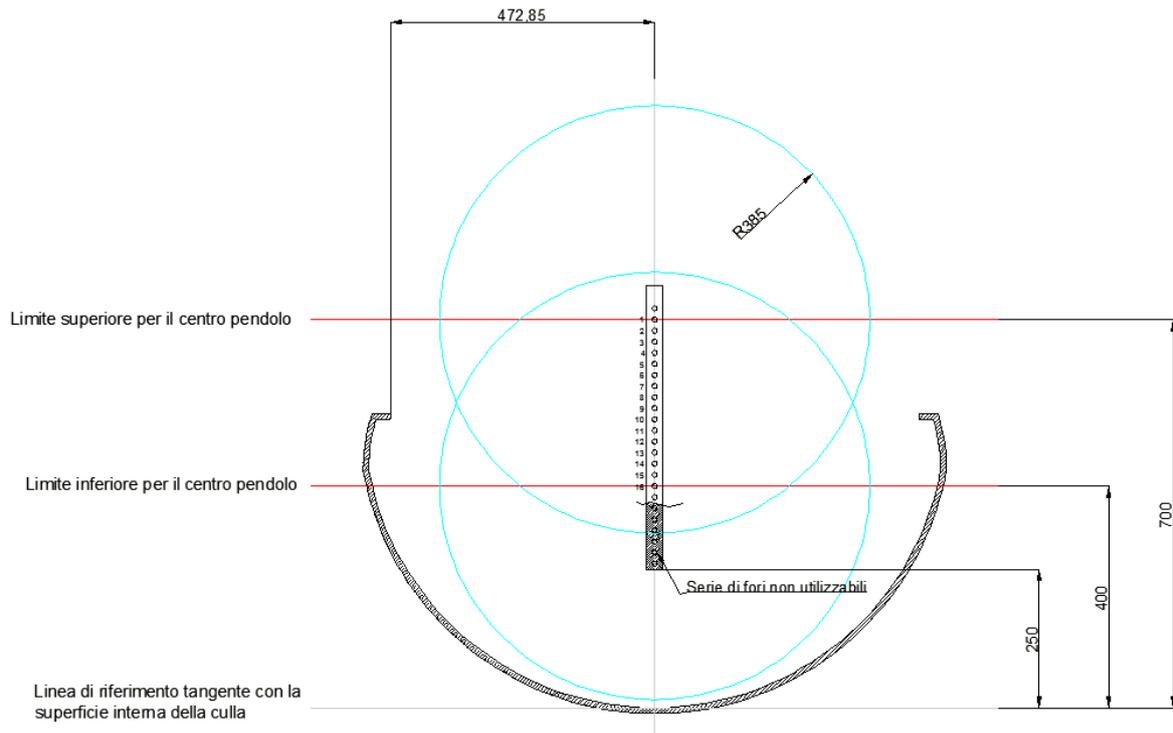


Figura 3 - Impostazione della posizione della cerniera del pendolo (asse del PTO)

La Tabella 1 riporta la distanza tra la cerniera del pendolo (distanza CG) e il baricentro dello scafo nelle diverse configurazioni utili.

Tabella 1 - Configurazioni geometriche del pendolo

Configurazione n.	Distanza CG m
1	0,50968
2	0,4923
3	0,47493
4	0,45755
5	0,44018
6	0,4228
7	0,40543
8	0,38806
9	0,37068
10	0,35331
11	0,33593
12	0,31856
13	0,30118
14	0,28381
15	0,26643
16	0,24906

Il comportamento idrodinamico dello scafo è stato studiato mediante simulazione numerica con ANSYS AQUA. L'amplificazione dell'oscillazione, espressa dal "Response Amplitude Operator" per le diverse configurazioni è riportato in Figura 4.

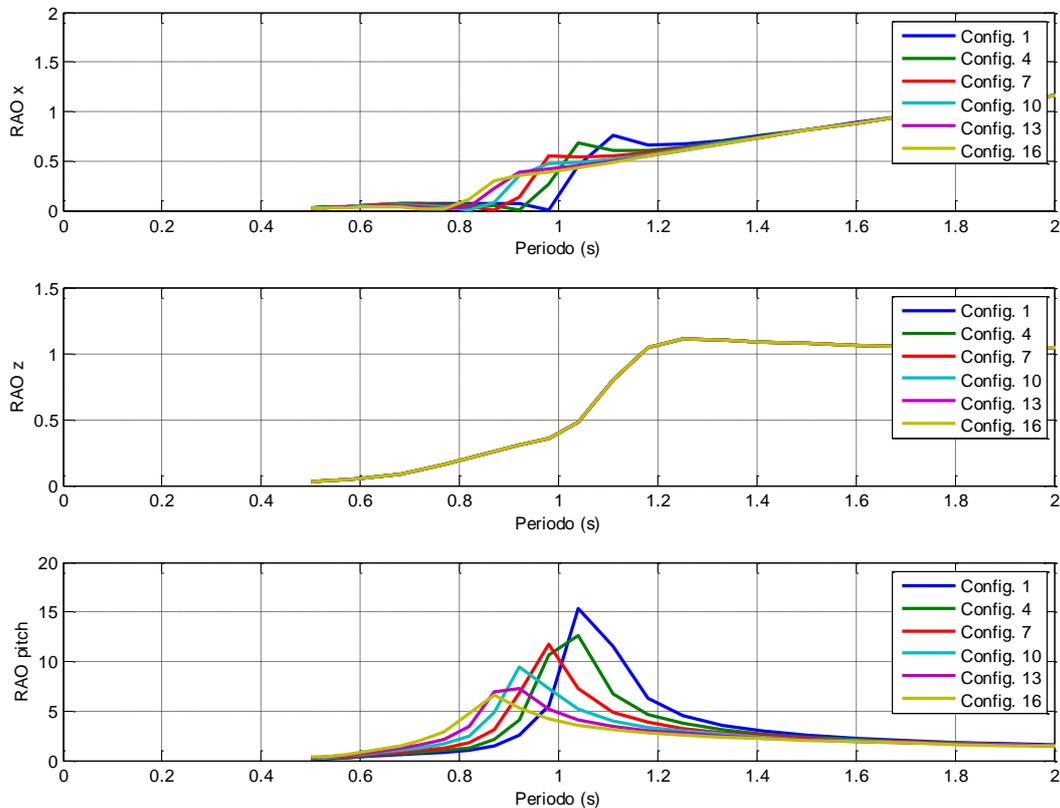


Figura 4 – RAO per le tre coordinate

Dalle simulazioni numeriche risulta che l'ampiezza di oscillazione maggiore si ottiene per la configurazione n. 1, cioè quella alla massima altezza dal fondo dello scafo. Le prove sperimentali sono state quindi svolte con tale configurazione per cercare le massime produttività di energia.

2.2 Svolgimento delle prove

La vasca navale di esecuzione delle prove è il bacino rettilineo n° 2 disponibile presso l'Istituto INSEAN sito in Via di Vallerano 139, 00128 Roma.



Figura 5 – bacini Rettilinei presso INSEAN (n°2 a sinistra, n° 1 a destra)

Quantità	Valore
Lunghezza	220 m
Larghezza	9 m
Profondità	3.5 m
Onda regolare	
Lunghezza d'onda	1 – 10 m
Periodo	0.8 – 2.53 s
Altezza	0.1 – 0.45 m
Pendenza	1 – 9°

Tabella 2 – Caratteristiche del bacino di prova n°2 INSEAN

Le prove consistono nel sottoporre il dispositivo, disposto nella configurazione n. 1, a onde regolari con altezza 0.05 m e periodo da 1 a 1.5 s, per circa 120 secondi.

Per impedire il trascinarsi dello scafo lungo il bacino da parte delle onde incidenti, viene installato un sistema di ormeggio ancorato al fondo del canale.

2.2.1 Il setup sperimentale

Il prototipo è stato posizionato nel bacino INSEAN, ormeggiato al fondo del canale ed è stato connesso ai sistemi di acquisizione e controllo.



Figura 6 – Varo del prototipo nel bacino

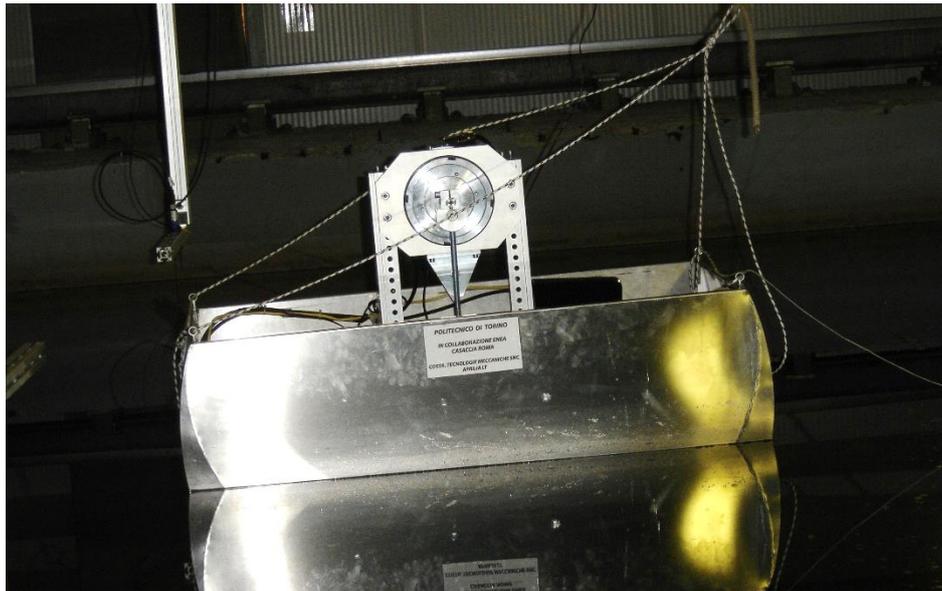


Figura 7 – Il prototipo in assetto di prova (vista laterale)



Figura 8 – Il prototipo in assetto di prova con copertura protettiva per le onde configurazioni ondose più critiche



Figura 9 – Il banco di controllo e acquisizione

2.2.2 Il sistema di ormeggio

Il sistema di ormeggio deve mantenere in posizione il prototipo senza alterarne la dinamica di funzionamento a causa delle forze trasmesse. Si è quindi optato per il sistema rappresentato in Figura 12, nel quale la catena di ormeggio ha un estremo vincolato a una massa appoggiata sul fondo del bacino, è collegata al galleggiante (jumper) e quindi raggiunge lo scafo. La presenza del galleggiante e il lungo tratto di catena che lo congiunge allo scafo fanno sì che il sistema di ormeggio mostri un comportamento elastico non lineare. Tale sistema non influisce sulla dinamica del moto di beccheggio dello scafo e al contempo lo trattiene in prossimità della posizione prescelta.

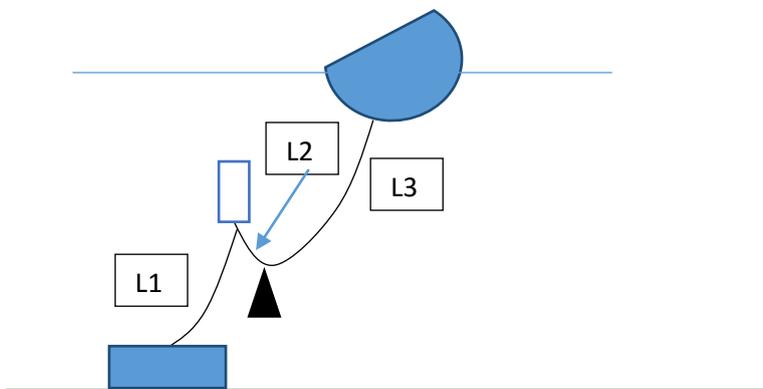


Figura 10 – Il Layout dell'ormeggio.

L1	2 m
L2	0.4 m
L3	2 m
Spinta positiva Jumper	15.37 N
Massa	~0.853 kg
Altezza corpo morto	0.5 m
Profondità dell'acqua	3.2 m

Tabella 3 – Valori dei parametri di ormeggio.



Figura 11 – configurazione dell'ormeggio a secco



Figura 12 – Installazione del sistema di ormeggio (operazione di sollevamento e vincolo al corpo morto posto in fondo al bacino)

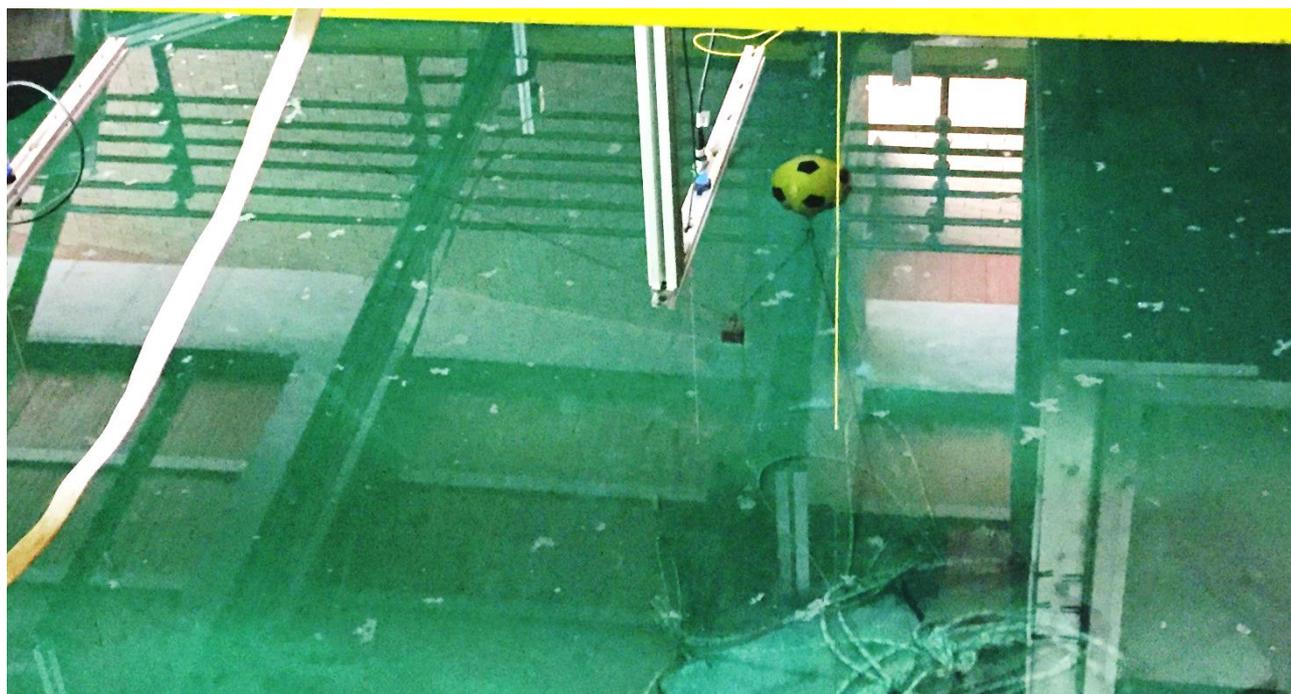


Figura 13 – Sistema di ormeggio in posizione

2.2.3 Misura del profilo dell'onda

Il profilo d'onda è misurato attraverso n° 7 sonde capacitive e n° 4 sonde a ultrasuoni poste come da layout mostrato in figura 14. Le sonde capacitive e a ultrasuoni sono acquisite con due sistemi di acquisizione diversi sincronizzati attraverso il segnale di trigger TTL fornito a inizio prova dal controllore di bordo del PEWEC.

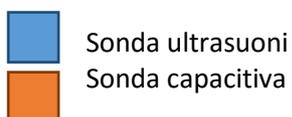
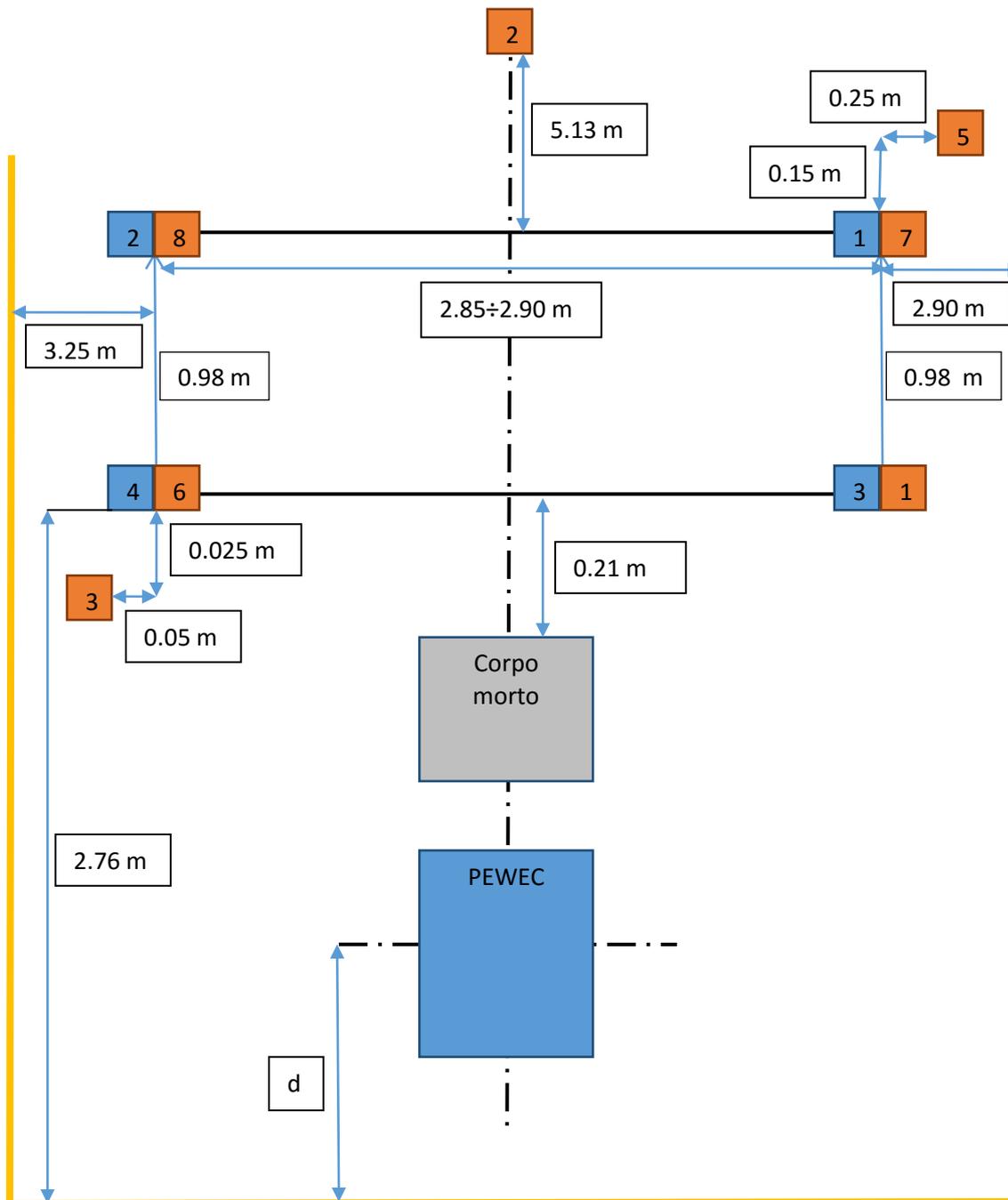


Figura 14 – Layout configurazione delle sonde.



Figura 15 – Testa di misura della sonda capacitiva

Caratteristiche della sonda dichiarate:

Tensione di alimentazione:	5V	(da 4,5V a 18V)
Sensibilità (con $R_a=1,2K\Omega$ $R_b=12K\Omega$):	s/pF	(da a)
Sensibilità:	s/mm	
Risoluzione teorica:	∞	
Risoluzione del sistema:	Max: conteggi/mm (sonda emersa)	
	Min: conteggi/mm (sonda immersa)	
Risoluzione fisica	Uguale al menisco $\cong \pm 0.5$ mm	
Segnale di uscita:	onda quadra a 5V duty cycle $\cong 50\%$	
Range in frequenza oscillatore:	da 150 KHz ad 1 MHz (1,8MHz a vuoto)	
Frequenza di acquisizione :	50 Hz	
Accuratezza sperimentale	1-2 mm	

Figura 16 – Caratteristiche della sonda capacitiva

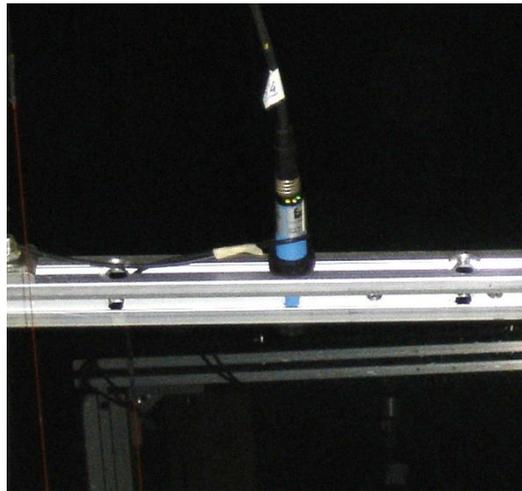


Figura 17 – Le sonde a ultrasuoni per la misura del profilo d’onda

Technical Data	Technische Daten	Données techniques	
Max. sensing distance Min. sensing distance Response time 90% of final value Beam angle	Max. Reichweite Min. Reichweite Ansprechzeit auf 90% des Endwertes Schallkeule	Portée Distance minimale Temps de réponse à 90% de la valeur finale Angle de faisceau	500 mm 60 mm 100 ms 8 °
Linearity error Repeatability of measured distance Temperature range Temperature compensation Operating voltage Possible min. supply Current consumption	Linearitätsfehler Wiederholgenauigkeit des Meßabstandes Temperaturbereich Temperaturkompensation Betriebsspannung Mögliche min. Versorgung Stromaufnahme	Erreur de linéarité Répétabilité Température de service Compensation température Tension de service Min. alimentation possible Courant consommé	<0.3 % +/- 0.2 % +/-1 mm -15 ... +70 °C Yes/Ja/Oui 15... 30 Vdc 12 Vdc <40 mA
Output Sensitivity Teach In P1 / P2 determines output position	Ausgang Steilheit Teach In Der Bereich wird durch P1 und P2 festgelegt	Sortie Sensibilité Apprentissage La gamme est défini par les positions P1 et P2.	4 ... 20mA Teach In
Plastic housing Sealing Attention !!! Do not expose sensor head to hot water > 50° C or water steam!!	Kunststoffgehäuse Schutzart Achtung !!! Den Sensorkopf nicht heißem Wasser >50°C oder Wasserdampf aussetzen!!	Boîtier plastique Étanchéité Attention !!! Ne pas mettre en contact continu la tête du capteur avec de l'eau avec une température supérieur à 50 °C ou avec de la vapeur d'eau	M18x1 IP67
Cable connection	Kabelanschluss	Connexion câble	2 m

Tabella 4 – Caratteristiche del sensore FAE FA 18-500

Le sonde forniscono un’uscita analogica in corrente 4-20 mA che viene convertita in tensione 2-10 V tramite l’inserimento in serie di una resistenza calibrata del valore di 500 Ohm.

La calibrazione del sistema è mostrata in figura 18.

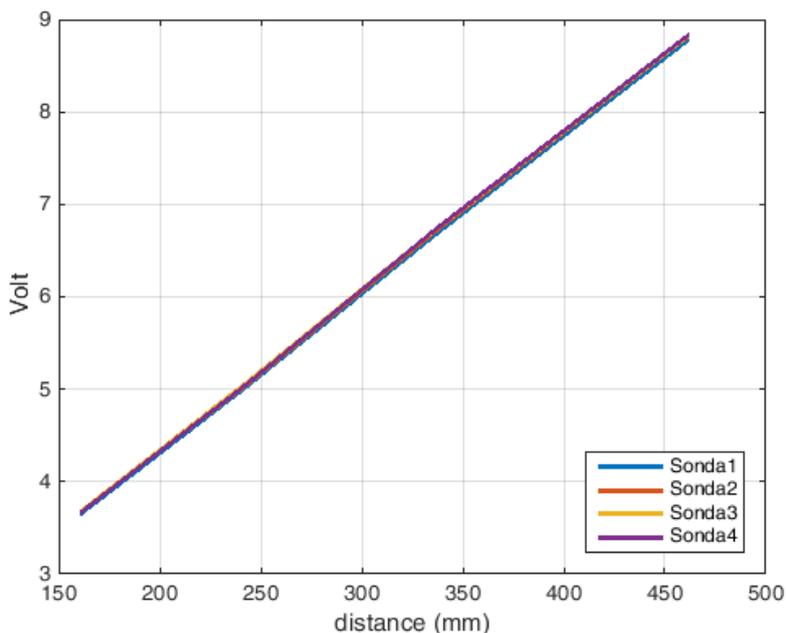


Figura 18 – Caratteristica di misura delle sonde a ultrasuoni.

2.2.4 Misura dell'angolo δ di beccheggio dello scafo

L'angolo δ di beccheggio dello scafo è misurato con il sensore inerziale MTi prodotto da Xsens. Tale sensore grazie ad accelerometri e giroscopi è in grado di misurare posizione e velocità nello spazio del corpo al quale è vincolato. Le caratteristiche del sensore sono mostrate in Tabella 4.

Tabella 5 – Caratteristiche del sensore MTi

Modello	MTi 30
Risoluzione angolare	0.05°
Ripetibilità	0.2°
Peso	50 g
Dimensioni	58 x 58 x 22 mm

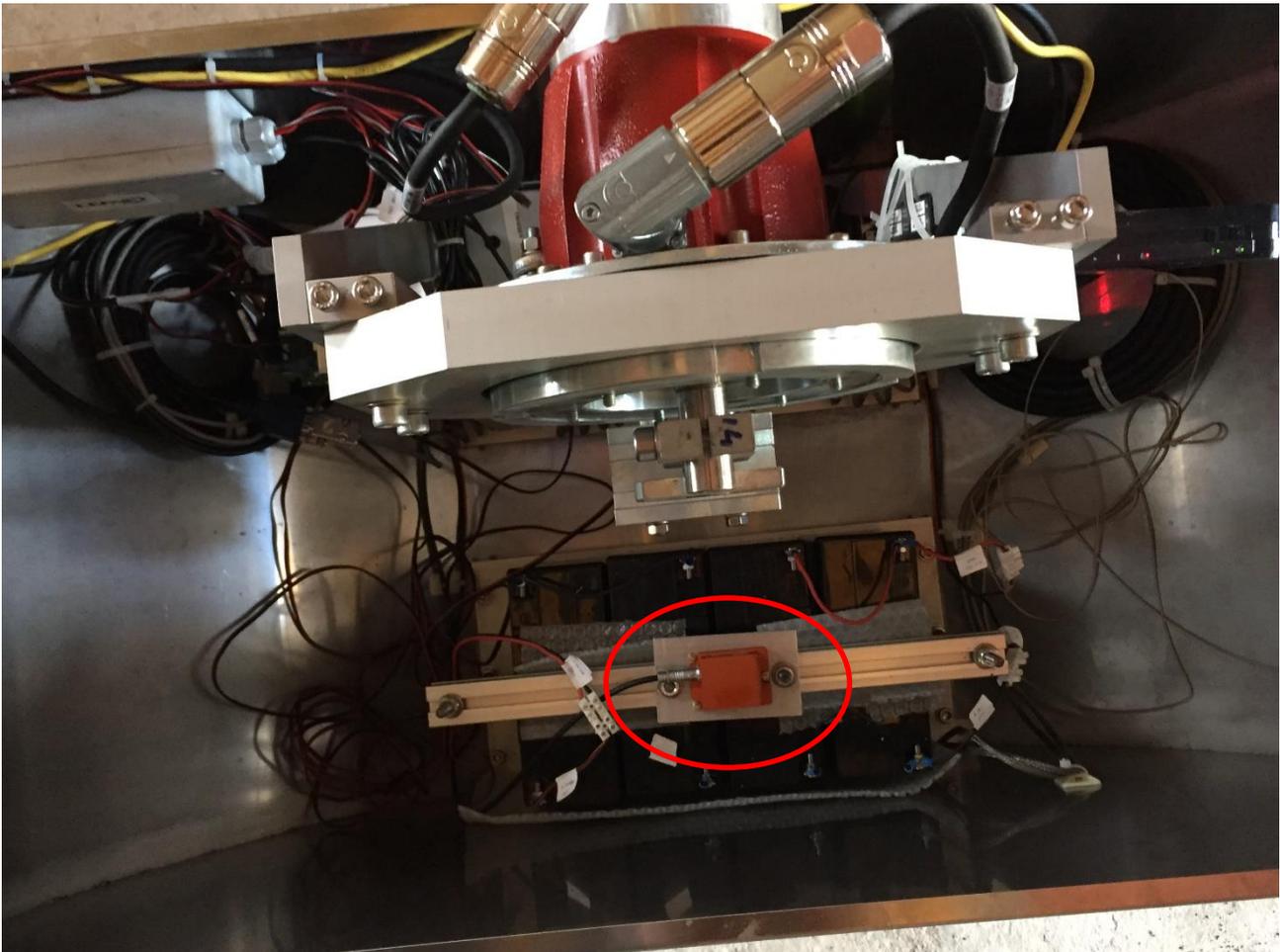


Figura 19 – Posizionamento del sensore MTi all'interno dello scafo

2.2.5 Misura di angolo, velocità e coppia agenti sul PTO

L'angolo e la velocità di oscillazione del pendolo relativi allo scafo sono misurati attraverso il trasduttore resolver integrato nel PTO. Il momento torcente agente sul PTO T_e può essere stimato tramite la corrente che circola nel PTO, sebbene tale misura indiretta possa essere soggetta a errore (variabilità durante il funzionamento della costante di coppia).

Si è quindi optato per un sistema di misura diretta della coppia composto da una sospensione dello statore del PTO abbinata a un braccio con cella di carico collegata al telaio. In questo modo nota la distanza fra l'asse della cella di carico e l'asse di rotazione del pendolo è possibile misurare la coppia di reazione scaricata dallo statore del PTO sullo scafo.

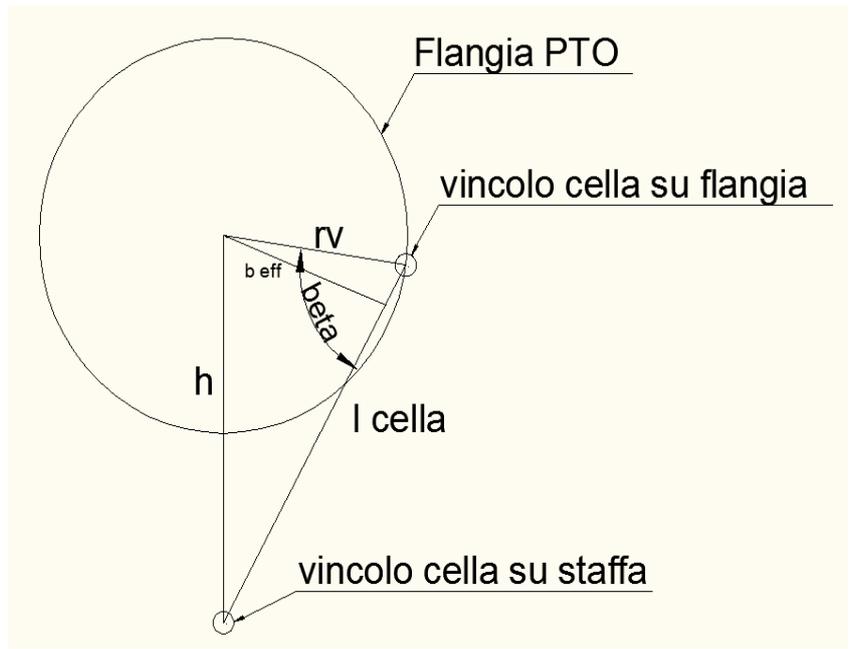
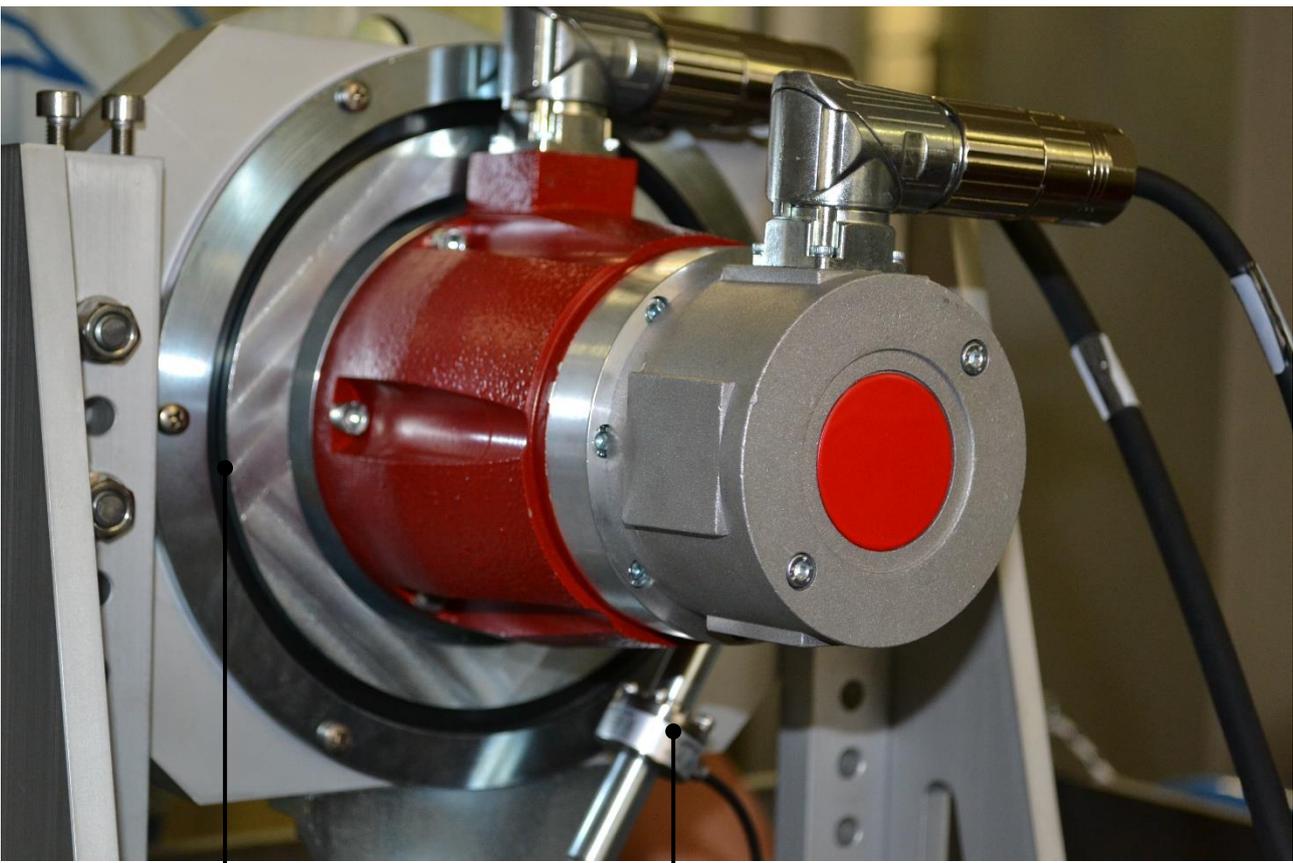


Figura 20 – Il layout di misura della coppia del PTO



Sospensione

Cella di carico

Figura 21 – Foto del layout di misura della coppia del PTO

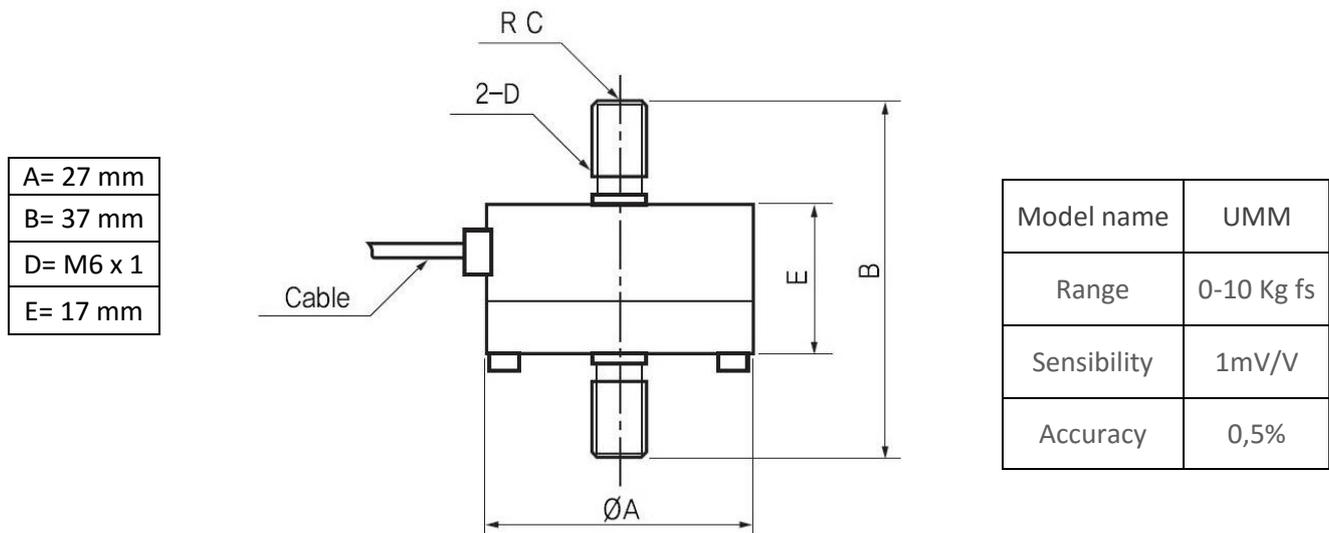


Figura 22 – caratteristiche della cella di carico

Di seguito si riporta la caratteristica di calibrazione del sistema di misura della coppia.

Tabella 6 – Calibrazione del sistema di misura di T_e .

Torque set (Nm)	Load cell voltage (V)	Epsilon (deg)	Output torque (Nm)
2	0,42	11,97	2,039
1,5	0,25	9,44	1,612
1	0,03	6,31	1,080
0,5	-0,24	3,04	0,521
0	-0,48	0,00	0,000
-0,5	-0,72	-3,02	-0,518
-1	-0,97	-5,94	-1,017
-1,5	-1,28	-9,28	-1,585
-2	-1,56	-12,31	-2,096

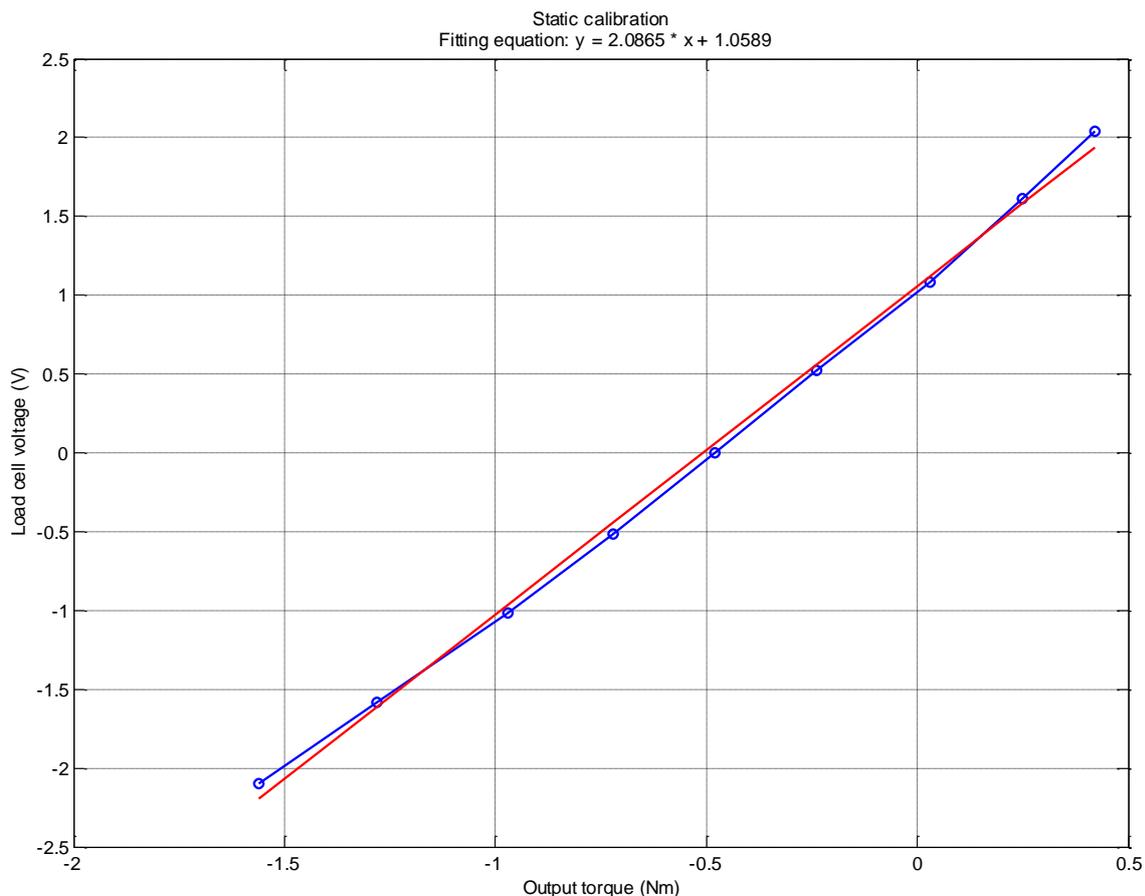


Figura 23 – Curva di calibrazione del sistema di misura della coppia

2.2.6 Il sistema di controllo del PTO

La legge di controllo del PTO è uno dei parametri che permettono di variare la coppia scambiata tra PTO e pendolo oscillante, variando così l'assorbimento di potenza da parte del sistema.

In queste prove il PTO è stato regolato in modo da comportarsi come un sistema molla smorzatore, con costante di elasticità k e coefficiente di smorzamento c .

$$T_\varepsilon = k\varepsilon + c\dot{\varepsilon}$$

La legge di controllo è implementata tramite il sistema National Instruments CompactRio. Il cRio è un controllore con intelligenza a bordo e con moduli di I/O per interfacciarsi al sistema da controllare. Nel nostro caso il cRIO esegue le seguenti operazioni:

1. Lettura di posizione e velocità dal driver del PTO
2. Lettura del segnale analogico proveniente dalla cella di carico
3. Valutazione della legge di controllo e invio del valore di coppia desiderata al driver del PTO

Il driver di controllo del PTO è un servosistema di controllo coppia che a partire da un set fornito di coppia lo impone sull'asse del PTO. Tale driver fornisce in uscita le grandezze posizione e velocità del PTO e comunica con il cRio tramite protocollo seriale.

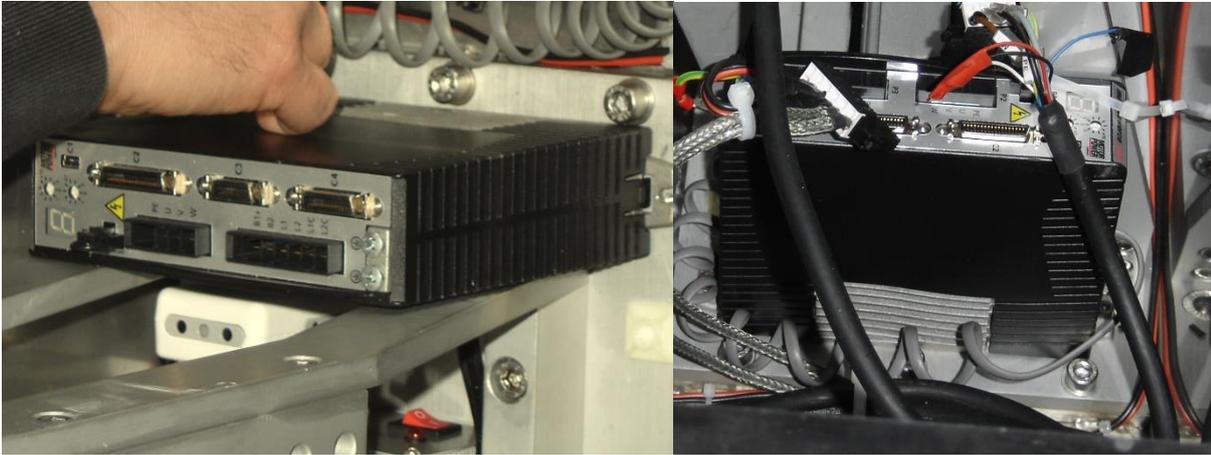


Figura 24 – Il driver del PTO

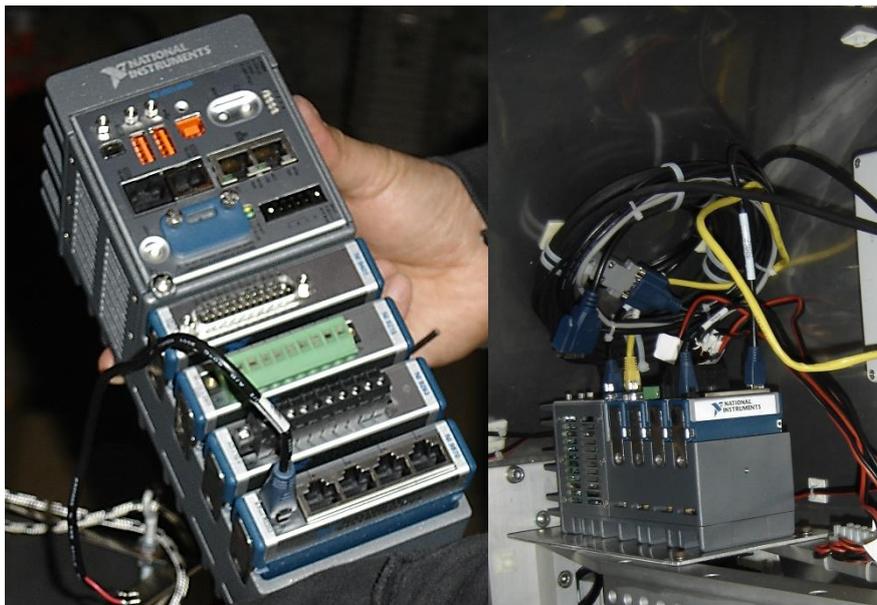


Figura 25 – Il sistema NI cRio

In modo da non perturbare la dinamica dello scafo e quindi indurre possibili errori di prova, il prototipo è stato progettato in modo da non necessitare l'utilizzo di cavi esterni che inducendo azioni sullo scafo ne variano il comportamento idrodinamico.

I cavi rimossi sono quelli relativi all'alimentazione energetica del sistema, alla trasmissione dei segnali acquisiti e alla sincronizzazione delle grandezze di bordo con quelle di vasca (trigger):

1. Il prototipo è completamente autonomo dal punto di vista energetico e non necessita di connessioni esterne. La fonte di energia è composta da 4 batterie a 12 V da 18Ah ciascuna. Le batterie sono organizzate in due pacchi separati composti di due batterie l'uno per la generazione delle tensioni 12 V cc e del 24 Vcc. La linea a 12 V è collegata all'inverter che alimenta il driver del PTO e il router WiFi a 230 Vac, mentre la linea a 24 V alimenta il controllore cRio e i sensori di bordo.

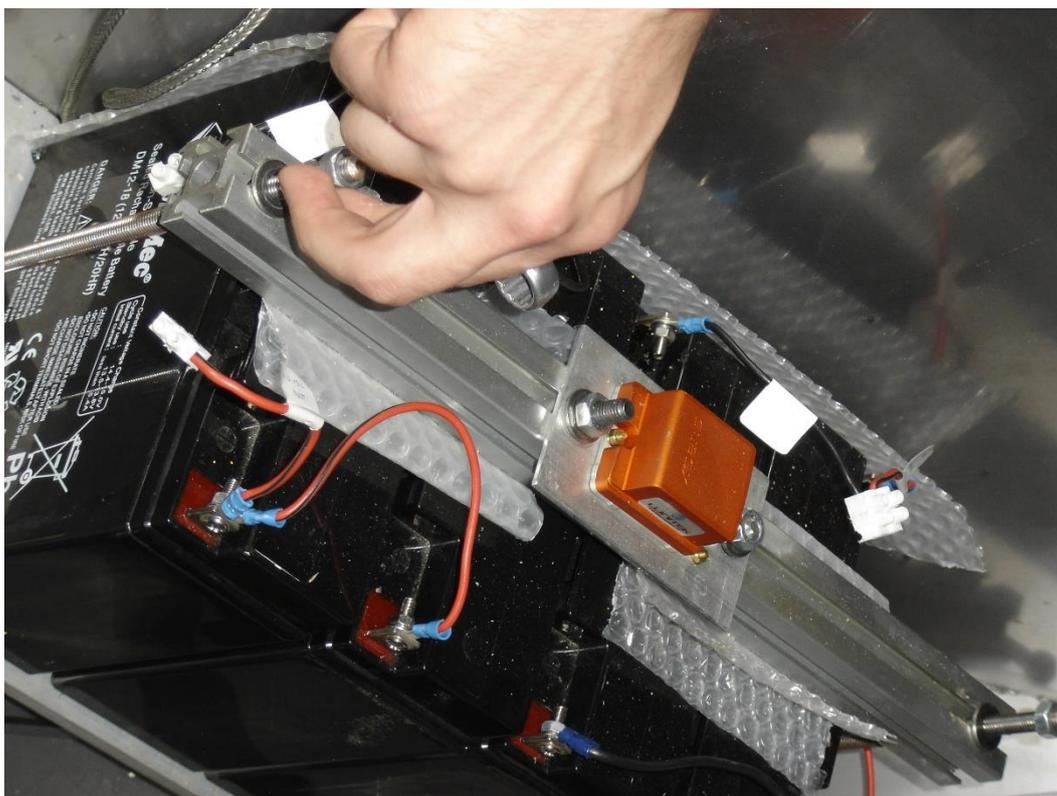


Figura 26 – Le batterie di bordo

2. Lo scambio di dati avviene senza l'utilizzo di cavi, in quanto il controllore cRio che funge da hub per l'acquisizione e il controllo dialoga con il PC di bordo vasca tramite rete WiFi ad hoc. Tale rete permette la configurazione dei coefficienti smorzanti ed elastici del PTO, l'avvio delle prove e lo scambio dei dati a termine prova.

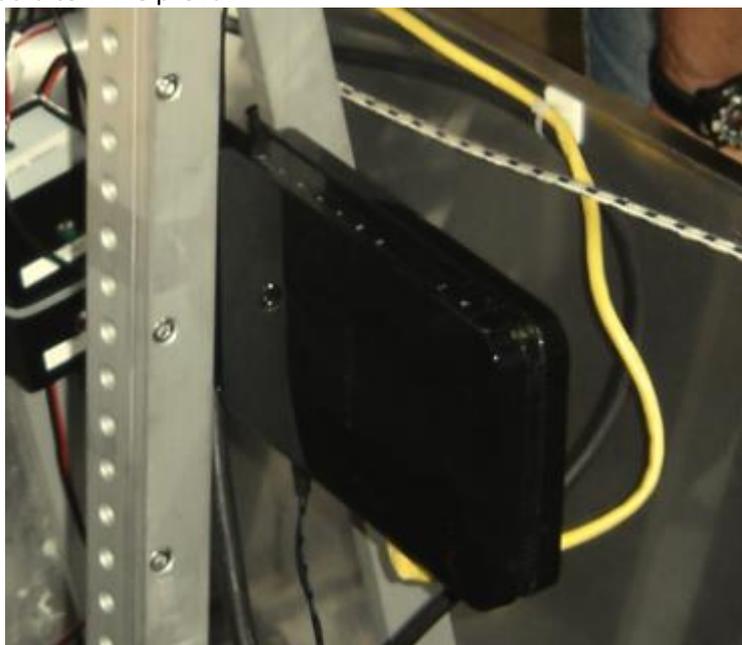


Figura 27 – Il router Wifi

3. La sincronizzazione delle grandezze di bordo con quelle della vasca avviene tramite un segnale di trigger wifi lanciato dal controllore cRio e recepito a bordo vasca come segnale digitale TTL dall'acquisitore INSEAN. In modo da evitare l'utilizzo di cavi per la trasmissione di questo segnale è stato modificato un sistema wireless di accoppiamento macchina fotografica / flash remoto di tipo professionale. Tale sistema permette l'invio a decine di metri di un segnale di trigger senza l'utilizzo di cavi.



Figura 28 – Il trigger WiFi

Il sistema di controllo e acquisizione implementato tramite il controllore cRio e anche i sistemi di acquisizione delle sonde sono lavorano con una frequenza di campionamento di 50 Hz.

2.2.7 Metodologia di esecuzione delle prove

Le prove sono state svolte con la seguente procedura.

1. Avvio del sistema di acquisizione dell'onda tramite sonde capacitive
2. Avvio del sistema di acquisizione del profilo d'onda tramite sonde a ultrasuoni
3. Avvio del sistema di controllo cRio che fornisce il segnale di trigger per gli acquisitori d'onda
4. Avvio del battitore e generazione dell'onda
5. Tempo di prova di circa 120 s
6. Spegnimento del battitore
7. Spegnimento del sistema di controllo del PTO (CompactRio) e conseguente spegnimento automatico del sistema di acquisizione del profilo d'onda
8. Attesa di circa 20 minuti per la stabilizzazione del bacino di prova

Sono state svolte tre tipologie di prova

1. Prove per l'identificazione della risposta in frequenza (RAO) a pendolo bloccato
2. Prove di risposta in frequenza con coefficiente di smorzamento pari a 0.5 Nms/rad e rigidità nulla
3. Prove con onda a periodo $T = 1.3$ s, $c = 0.5$ Nms/rad e rigidità variabile

Le prove sono state eseguite mantenendo costante l'altezza dell'onda generata; ne è stato variato il periodo, al fine di valutare le prestazioni del sistema per diverse frequenze di onda regolar incidente.

I parametri di prova sono riportati in Tabella 5, mentre i parametri di configurazione del prototipo sono riportati in Tabella 6.

Tabella 7 – Onde di prova

Parametro	Valore
Altezza d’onda picco-picco (m)	0.05
Periodo d’onda (s)	1 – 1.1 – 1.2 – 1.3 – 1.4 – 1.5

Tabella 8 – Impostazioni del prototipo

Parametro	Valore
PTO	Configurazione n°1
Lunghezza pendolo	0.334 m
Massa oscillante	3 kg
Massa prototipo	75 kg
Costante di elasticità del PTO (k)	-5, -2, -1, -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5, 1, 2 Nm/rad
Coefficiente di smorzamento del PTO (c)	0.5 Nms/rad
Distanza del sistema dal battitore	60 m

2.3 Risultati delle prove

Ogni prova acquisita durante i test è stata analizzata per valutare le performances del sistema.

Si possono così vedere gli andamenti di:

- $\varepsilon(t)$ = rotazione relativa pendolo-scafo
- $\dot{\varepsilon}(t)$ = velocità angolare relativa pendolo-scafo
- T_{PTO} = coppia agente sull’asse del generatore
- P_{PTO} = potenza assorbita dal generatore
- $\delta(t)$ = angolo di beccheggio scafo

2.3.1 Prove per l’identificazione della risposta in frequenza (RAO) a pendolo bloccato

La prime serie di prove eseguite a pendolo bloccato hanno permesso di identificare il RAO nel range di frequenza ω , nel nostro caso, di periodi di interesse.

La Figura 29 mostra l’andamento tipico dell’angolo di beccheggio di una prova a pendolo bloccato per periodo 1.2 s:

- a. Primo periodo iniziale nel quale l’onda percorre il tragitto dal battitore al prototipo fino a 130 s circa
- b. Fra 130 s e 280 s in cui il sistema è sottoposto alla rampa di inizio del treno d’onda di 20 cicli e seguentemente si ha un assestamento del sistema di ormeggio fino a giungere alla posizione di lavoro intorno ai 280 s
- c. Un tratto di operazione stabile fra i 280 s e i 380 s circa
- d. Il sopraggiungere delle riflessioni dal fondo della vasca dai 380 s in poi e la rampa di discesa del treno d’onde

Ogni periodo d’onda ha il suo andamento caratteristico in funzione della sua velocità di propagazione e dell’interazione con il sistema.

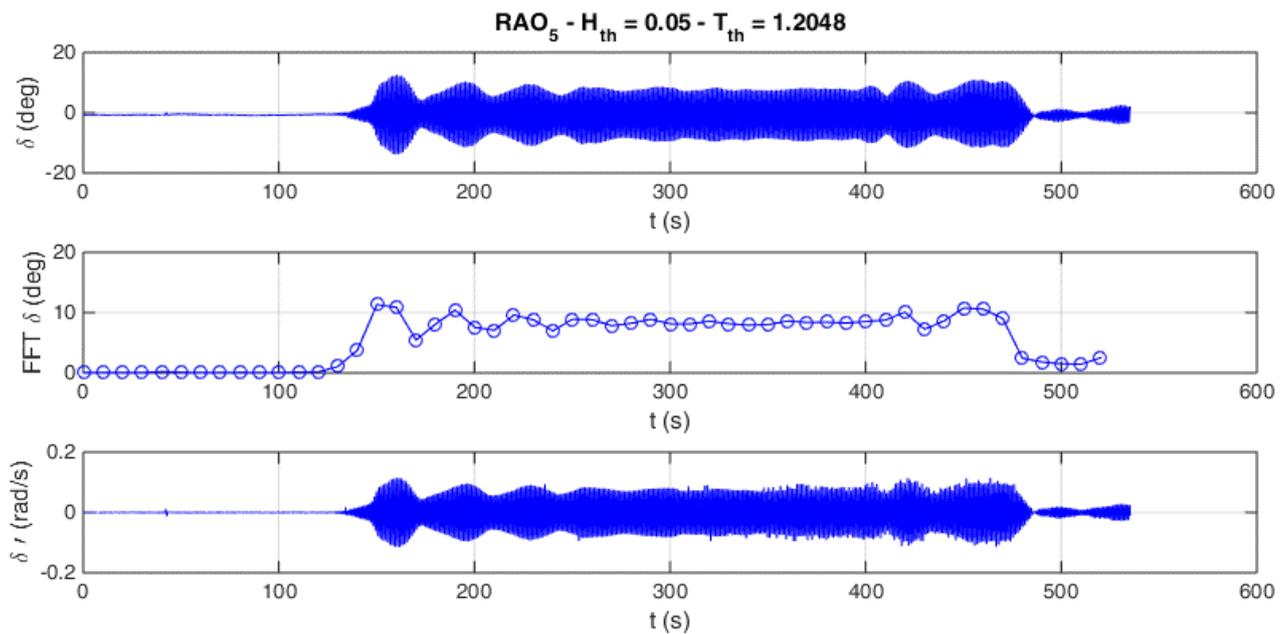


Figura 29 – Andamento temporale dell’angolo e velocità di beccheggio e picco della trasformata di Fourier a finestra mobile.

La stessa analisi è fatta per l’andamento nel tempo dell’elevazione dell’onda e, tramite il rapporto delle densità spettrali di potenza per le frequenze d’interesse è possibile determinare il RAO (Response Amplitude Operator) dello scafo, mostrato in Figura 30. Si nota come lo scafo presenti un picco della risposta per 1.3s, periodo per il quale si svolgerà gran parte delle prove. Il RAO è stato valutato usando le 4 sonde a ultrasuoni dando risultati comparabili.

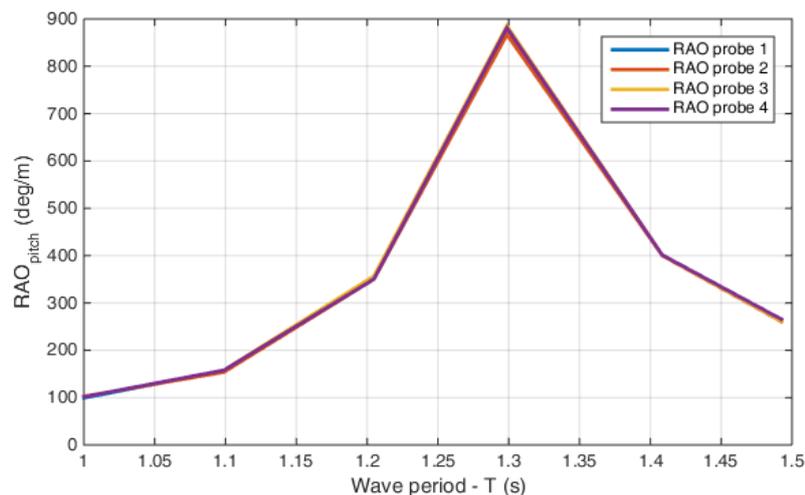


Figura 30 – RAO del prototipo con pendolo bloccato.

2.3.2 Prove di risposta in frequenza con coefficiente di smorzamento pari a 0.5 Nms/rad e rigidezza nulla

Le figure seguenti mostrano le prove a periodo variabile e smorzamento fisso pari a 0.5 Nms/rad, valore ritenuto ottimale in base alla campagna di prove svolta presso il Politecnico di Torino nel 2014.

Nei diagrammi riportati in figura 18 sono mostrati gli andamenti temporali delle grandezze del PTO per la prova con periodo d'onda 1.3 s e coefficiente di smorzamento del PTO pari a 0.5 Nms/rad.

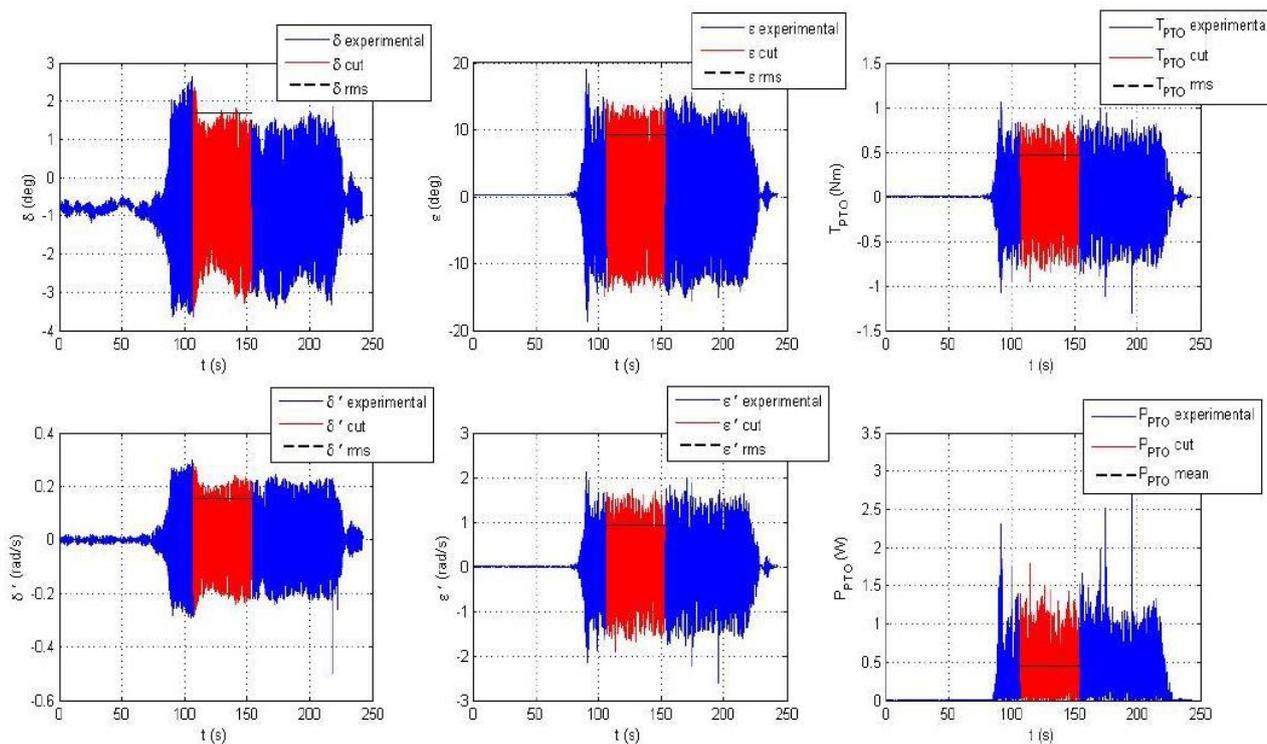


Figura 31 – Grandezze misurate ($T = 1.1$ s, $c = 0.5$ Nms/rad)

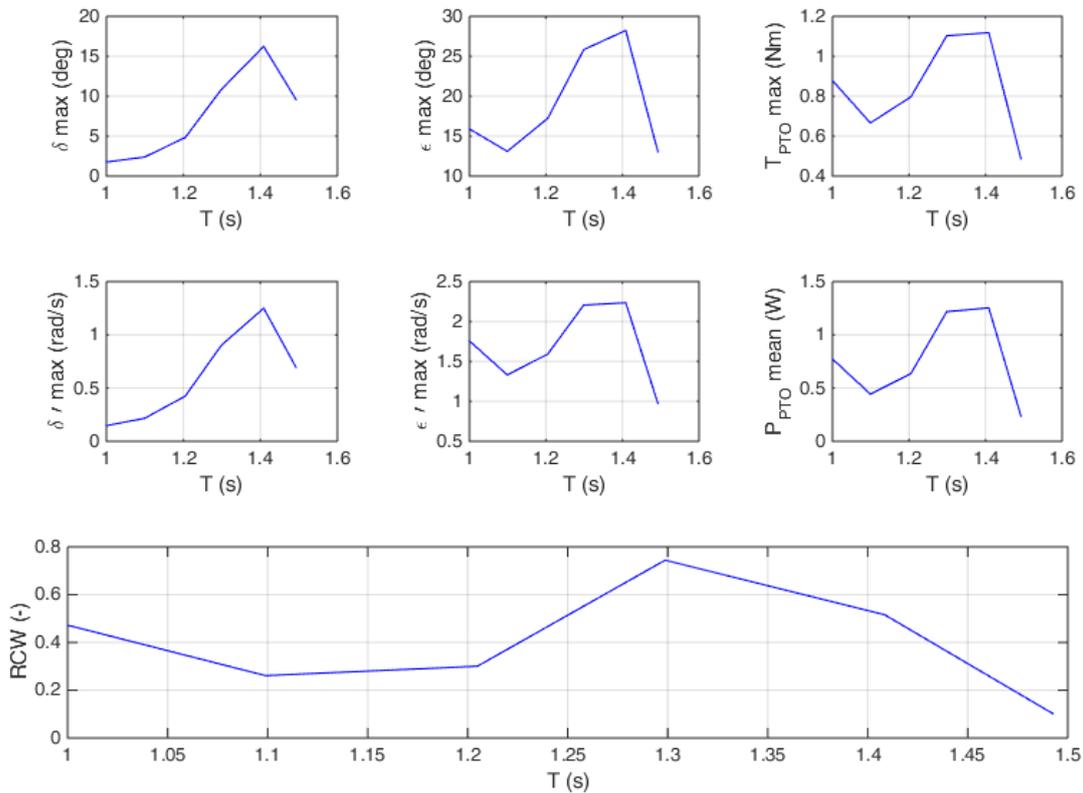


Figura 32 – Sintesi delle grandezze di prova

La Relative Capture Width è il rapporto fra la potenza uscente dal PTO e la potenza ondata in ingresso. La potenza ondata in ingresso è il prodotto fra la densità di potenza P_w (W/m) e la larghezza dello scafo W (m).

$$RCW = \frac{P_{PTO}}{P_w \cdot W}$$

Di seguito si confrontano le RCW conseguite nel 2014 presso il canale di prova del Politecnico e nel 2015 presso la vasca prova INSEAN: si nota come le capacità di cattura energetica sia considerevolmente maggiore nella nuova campagna del 2015, con incrementi del parametro RCW fino al +115%. Le maggiori dimensioni della vasca prova e il migliorato layout wireless permettono di ridurre le resistenze nel movimento dello scafo (sfregamento contro le pareti nel canale del Politecnico di Torino e presenza dei cavi di collegamento) che quindi è in grado di trasferire maggiore energia al pendolo ovvero al PTO.

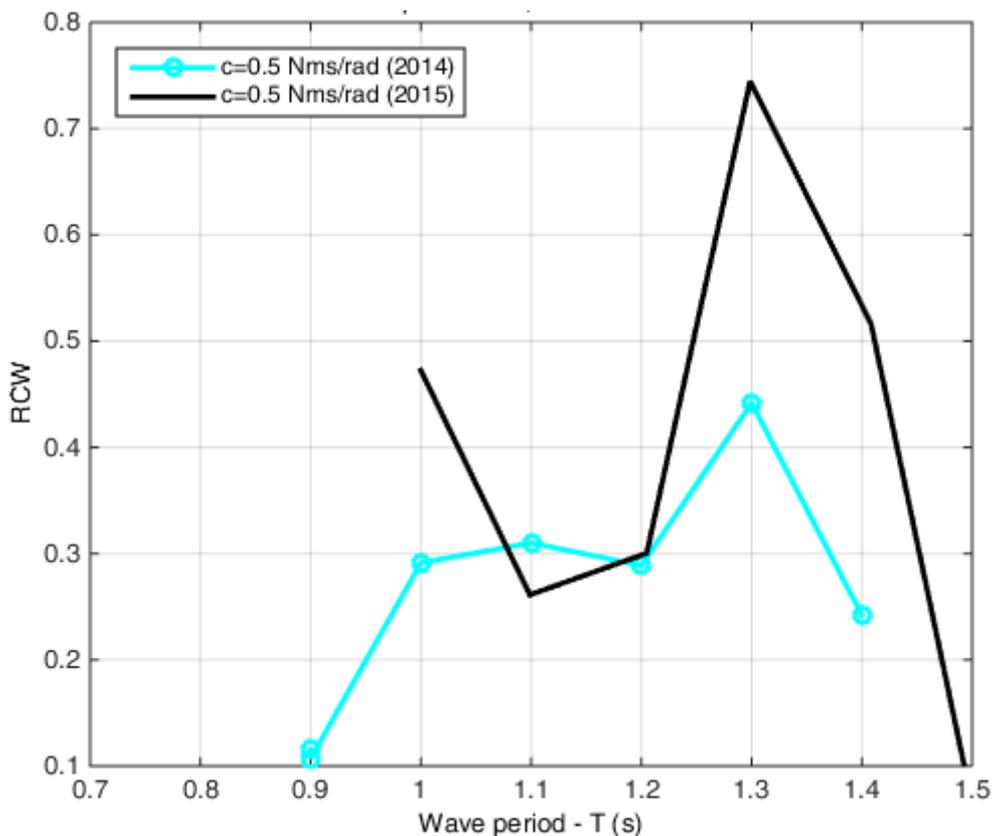


Figura 33 – Confronto fra risultati sperimentali 2014 e 2015

Tabella 9 – Relative Capture Width 2014 e 2015

T (s)	RCW 2015	RCW 2014	2015/2014
0.9	-	0.1071	-
1.0	0.47	0.29	62.2%
1.1	0.26	0.31	-15.8%
1.2	0.30	0.29	4.1%
1.3	0.74	0.44	68.5%
1.4	0.52	0.24	113.0%
1.5	0.10	-	-

2.3.3 Prove con onda a periodo T = 1.3 s, c = 0.5 Nms/rad e rigidità variabile

In questo set di prove si desidera usare il PTO per variare il periodo naturale del pendolo. Tale operazione è utile nel caso si desideri operare una regolazione della capacità di assorbimento del PEWEC senza spostamento di masse (variazione lunghezza pendolo, altezza cerniera, variazione masse scafo). Inserendo una costante elastica oltre a quella smorzante nella legge di controllo del generatore è possibile variare il periodo naturale del pendolo come indicato in Figura 34.

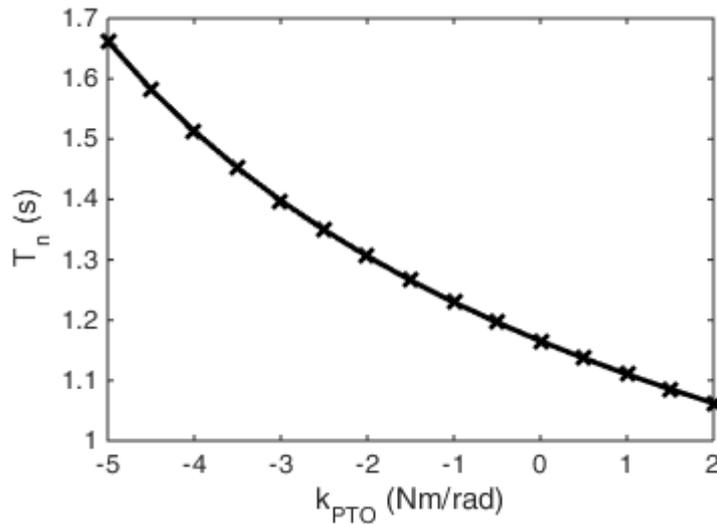


Figura 34 – Variazione del periodo naturale del pendolo in funzione della costante elastica impostata sul PTO.

Di seguito si mostrano gli andamenti sintetici delle grandezze acquisite durante le prove di variazione della costante elastica. Si può notare che la variazione della costante elastica produce un aumento pari all'11 % della Relative Capture Width che passa da 0.74 per $k = 0$ Nm/rad a 0.82 per $k = 0.5$ Nm/rad. Costanti elastiche negative producono esclusivamente una riduzione delle prestazioni.

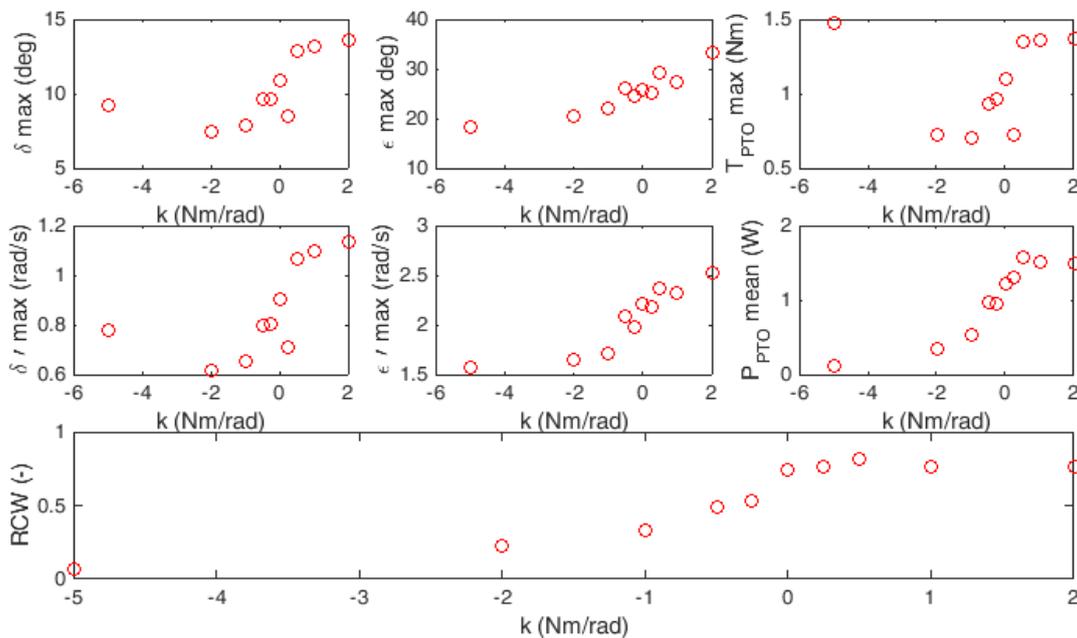


Figura 35 – Sintesi delle grandezze di prova

3 Conclusioni

Nel presente lavoro si è mostrata l'attività di sperimentazione sul prototipo di sistema di conversione di energia da moto ondoso a massa oscillante. In tale sistema le onde provocano l'oscillazione dello scafo che viene trasmessa al pendolo contenuto internamente. Il moto relativo scafo-pendolo attiva un generatore che produce energia elettrica.

Il prototipo in scala realizzato in collaborazione con ENEA è stato provato sperimentalmente presso il bacino di prova n° 2 dell'INSEAN. I test sono stati effettuati con onda regolare in un intervallo di periodi compreso fra 1 e 1.5 s, in modo da avere una risposta del sistema per le diverse frequenze dell'onda incidente. In questa prima fase il coefficiente di smorzamento del PTO è stato impostato a 0.5 Nms/rad, valore ottimale ricavato dalla precedente campagna di prova presso il Politecnico di Torino nel 2014. In una seconda serie di prove il parametro di costante elastica della legge di controllo del generatore è stato variato per identificare le massime potenze estraibili nelle condizioni di risonanza dello scafo.

La modifica del presente layout di prova rispetto a quello del 2014 riguarda la messa a punto di un sistema di controllo del prototipo wireless (telemetria) per evitare l'influenza dei cavi di segnale e di potenza sulla dinamica del sistema. Inoltre lo svolgimento delle prove in un bacino con maggiore larghezza e maggiore profondità dell'acqua garantisce la riduzione delle interazioni del sistema con il fondale e le pareti.

Le modifiche apportate al layout hanno permesso di incrementare del 115 % la capacità di assorbimento dell'energia ondosa (Relative Capture Width, RWC) del prototipo in condizioni di risonanza.

Infine un miglioramento della legge di controllo, con l'inserimento di una legge elastica, ha permesso un ulteriore miglioramento del parametro RCW dell'11%.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] Nicola Pozzi, *Modeling and testing of a Wave Energy Converter*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Ottobre 2014
- [2] Giovanni Rinaldi, *Approcci fisico-matematici per lo sviluppo di dispositivi inerziali per la produzione di energia dal moto ondoso*, Rapporto tecnico ENEA (in preparazione)
- [3] Simone Drocco, *Analisi dinamica di un sistema per la produzione di energia da moto ondoso con architettura a pendolo*, Tesi di Laurea Politecnico di Torino
- [4] Giovanni Bracco et al., *A Pendulum based Wave Energy System*, atti del convegno "Energia dal mare – Le nuove tecnologie per i mari italiani", ENEA 1 e 2 luglio 2014
http://www.enea.it/it/enea_informa/events/energia-dal-mare/energia-dal-mare2
- [5] Stefano Roveda, *EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A PENDULUM BASED INERTIAL SEA WAVES CONVERTER* Bachelor Thesis, Politecnico di Torino, 2014.
- [6] Perez, Tristan, and Thor I. Fossen. "A matlab toolbox for parametric identification of radiation-force models of ships and offshore structures." (2009): 1-15.
- [7] Fossen, Thor I., and Øyvind N. Smogeli. "Nonlinear time-domain strip theory formulation for low-speed manoeuvring and station-keeping." *Modeling, identification and control* 25.4 (2004): 201-221.
- [8] EquiMar Deliverable 3.3 "Assessment of current practice for tank testing of small marine energy devices", Accessed September 2014, <http://www.equimar.org/equimar-project-deliverables.html>